

# 최대출력을 얻기 위한 유도급전장치의 형태에 따른 전자장 해석

## Analysis of electromagnetic fields in relation to the forms of IPT systems to get maximum output

최석진†      오윤상\*      이상진\*\*      이병송\*\*\*      박찬배\*\*\*      이형우\*\*\*  
Sukjin Choi    Yun-Sang Oh    Sangjin Lee    Byung Song Lee    Chan-Bae Park    Hyung-Woo Lee

### ABSTRACT

The equivalent circuits intended to analyze the characteristics of IPT systems can be shown in structures similar to those of existing transformers. IPT systems are composed of combinations of the primary and secondary coils based on magnetic coupling, and the performances are determined by the lengths or the degrees of magnetic coupling of current collecting conductors(secondary) and feeding rails (primary) and system performances become the maximum when they are coupled under the optimum condition.

To maximize the output currents of the secondary side, the shapes of iron cores and the structures of coils etc should be considered. To this end, three types of IPT system simulation models were selected and they were analyzed using an electromagnetic field analyzing program. To compare the types with each other, the sizes of the IPT systems and the primary side voltages etc were made to be the same. The electromagnetic fields were analyzed while changing the thicknesses of the cores and the lengths of the air gap etc and the results were analyzed in order to derive the optimum specifications.

### 1. 서론

현재 이용 중인 교통수단에 의한 환경오염의 90%는 도로 교통수단에서 발생하며, 도로 혼잡으로 인한 과도한 물류비용이 연간 GDP의 16% 정도 소요되는 것으로 파악되고 있다. 이러한 상황에서 개인의 프라이머시가 보장되고 ‘door to door’ 수송이 가능한 전기자동차의 장점과, 정시성 및 안전성 등에서 뛰어난 철도차량의 장점을 결합한 도시철도 시스템이 미래의 교통수단으로써 부각되고 있는 실정이다. 그러나, 아직은 전기충전 인프라 구축 및 충전이 번거롭다는 난점과 ‘door to door’ 서비스 제공의 여러 가지 문제점이 예견되고 있다. 기존의 궤도시스템은 접촉에 의한 전력공급 장치를 사용하는 관계로 유지 보수 및 관리비용이 높으며, 미관상 환경 친화성이 떨어지며 우발적인 접촉으로 인한 안전 문제의 발생 가능성이 있다. 또한 기존의 방식은 전력급전을 위한 가공 전차선이나, 지상의 구조물 없이 주행이 불가능하다는 어려움을 안고 있다.

† 책임저자 : 정회원, 벡터필드코리아  
E-mail : sjchoi@vfk.co.kr  
TEL : (054)223-2431 FAX : (054)223-2430  
\* 정회원, 벡터필드코리아  
\*\* 정회원, 위덕대학교, 에너지전기공학부, 부교수  
\*\*\* 정회원, 한국철도기술연구원, 주행추진연구실

접촉에 의해 전력을 공급하는 기존방식의 단점을 극복하기 위한 방안의 하나로서 궤도 주행 중 전기 충전이 가능한 무접촉 방식의 유도급전을 이용한 집전장치의 필요성이 고려되기 시작하였고, 그에 따라 유도급전 메카니즘의 개발이 필요한 실정이다. 환경 친화성이 뛰어난 것은 물론 궤도 교통수단의 장점을 동시에 이용할 수 있는 도로/궤도 겸용 시스템을 개발하기 위해서는 중장기적인 개발계획을 세우고 그에 따라 고효율 유도급전을 이용한 집전시스템에 대한 연차별 세부계획을 세워서 종합적 시스템 핵심기술을 개발해야 할 것이다.

본 논문에서는 유도급전 시스템의 핵심기술 분야라 할 수 있는 Track Conductor와 Pickup Magnet의 기술 개발을 위하여, 관련된 선도기술 조사 및 자료를 분석하고, 전자장해석을 이용한 성능 비교를 통하여, Track Conductor와 Pickup Magnet에 적합한 모델을 제시하고자 한다.

## 2. 본론

### 2.1 유도급전장치의 특성해석

유도급전장치의 특성해석을 위한 등가회로는 기존의 변압기와 유사한 구조로 나타낼 수 있다. 유도급전 시스템은 자기적 특성에 의한 1·2차 권선의 조합으로 구성된다. 유도급전 시스템은 1차측의 코어와 2차측의 코어가 분리되어 있고 권선 영역도 나뉘어져 있기 때문에 자로의 자기 저항이 증가하고 코어 내부의 자속밀도도 낮아진다. 이때의 자속밀도는 다음 식(1)로 나타낼 수 있다.

$$B_f = \frac{NI}{\frac{l_f}{\mu_f} + \frac{l_g}{\mu_0}} \quad (1)$$

( $l_f$ : 코어의 길이,  $l_g$ : 공극의 길이,  $\mu_f$ : 코어의 투자율,  $\mu_0$ : 공극의 투자율)

공기중의 투자율이 코어의 투자율보다 상대적으로 매우 낮다. 낮은 코어의 자속밀도로 인해 코어는 쉽게 포화되지 않으며 히스테리시스 현상에 의한 코어의 손실도 공극이 없을 때 보다 적어진다. 그러나 공극이 크므로 자기저항이 증가하고 코어의 인덕턴스는 감소한다. 따라서 자화 인덕턴스를 만들기 위한 권선수가 증가하게 되며 넓은 권선영역이 필요하게 된다. 자화 인덕턴스는 아래의 식(2)로 표현할 수 있다.

$$L_\mu = \frac{N_1}{N_2} L_m = \frac{N_1}{N_2} \left( \frac{N_1 N_2}{R_m} \right) = \frac{N_1^2}{R_m} \quad (2)$$

( $L_m$ : 상호 인덕턴스)

위의 식(2)에 의하면 변압기의 결합계수를 높이기 위해선 코어를 마주보는 단면적이 넓어야 한다는 것을 알 수 있다. 또한 유도급전 시스템의 성능은 집전도체(2차)와 급전레일(1차)의 길이나 자기적 결합 정도에 따라 다르게 되며, 최적의 조건으로 결합되었을 경우 시스템 성능은 최대가 되게 된다.

2차측 출력전류를 최대로 하기 위해서는 철심의 형상과 권선구조 등이 고려되어야 한다. 이를 위하여 3가지 타입의 유도급전 시스템 시뮬레이션 모델을 선정하고, 이를 전자장 해석 프로그램을 사용하여 해석하였다. 각 타입의 비교를 위하여 유도 전력 급전장치의 크기, 1차측 전압 등을 일치시켰다. 코어의 두께나 공극의 길이 등을 변화시켜가며 전자장 해석을 수행하고 그 결과를 분석하여, 유도급전 시스템에 가장 적합한 형태를 결정할 수 있도록 하였다.

### 2.2 유도급전장치의 모델별 분류 및 해석

#### 2.2.1 TYPE 1(오클랜드 대학의 검토 모델)

첫 번째 형상은 오클랜드 대학의 검토 모델이며, 1차측 코일이 지지대 위에 위치하며, 2차측 코일은 2차측 코어에 감겨져 있는 형태이다. 첫 번째 유도급전 모델의 형상은 다음 그림 1과 같다.

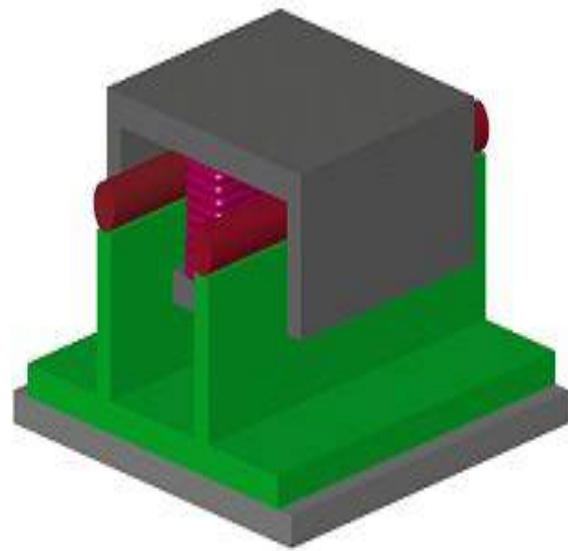
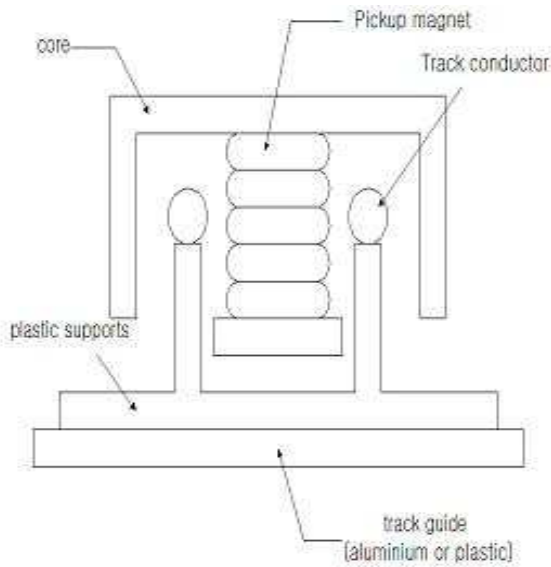


그림 1. TYPE 1 모델 형상

이러한 형상을 갖는 모델에 대해서, 2차측 코어의 두께를 30~170mm까지 20mm씩 증가시켜가며 전자장 해석을 수행하였고, 다음 그림 2, 3은 그 전자장 해석 결과를 그림으로 나타낸 것이다. 화살표는 자장의 방향과 세기를 나타낸 것이며, 코어의 두께가 두꺼워짐에 따라 자장이 코아에 집중되지 않고 퍼지는 경향을 나타내고 있다.

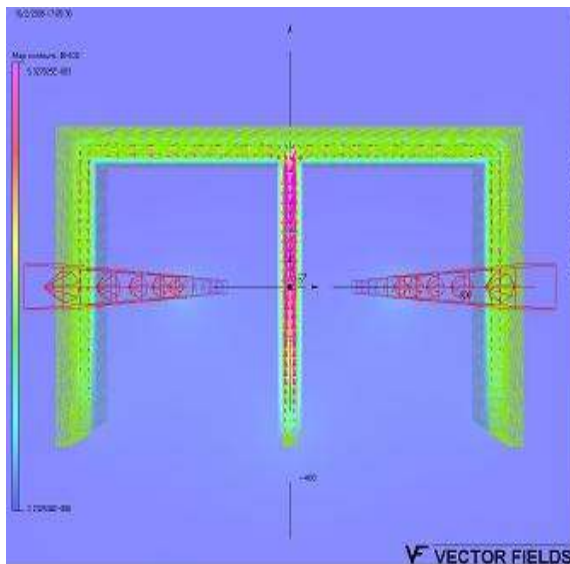


그림 2. 코어의 두께가 30mm일 때

코어의 두께가 두꺼워짐에 따라 2차측 코아에 흐르는 flux의 양은 많아지지만, 유도급전 시스템의 무게가 무거워지는 단점을 가지게 된다. 결국, 2차측의 출력만을 고려하면 2차측 코아가 두꺼워지는 게 유리하지만, 유도급전 시스템의 무게를 고려한다면 2차측 코아가 얇을수록 유리하다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 코어의 두께에 따른 단위 면적당 flux를 비교하였다. 그 결과를 보면, 코어의 두께가 두꺼워짐에 따라 단위 면적당 flux가 줄어드는 것을 알 수 있다. 2차측 출력을 충분히 낼 수 있는 flux를 얻을 수 있는 조건에서 코어의 두께를 최대한 얇게 선택하도록 하여야 한다. 즉, 첫 번째 형상의 유도급전 시스템은 2차측 출력이 모델 선정의 경계조건이 된다.

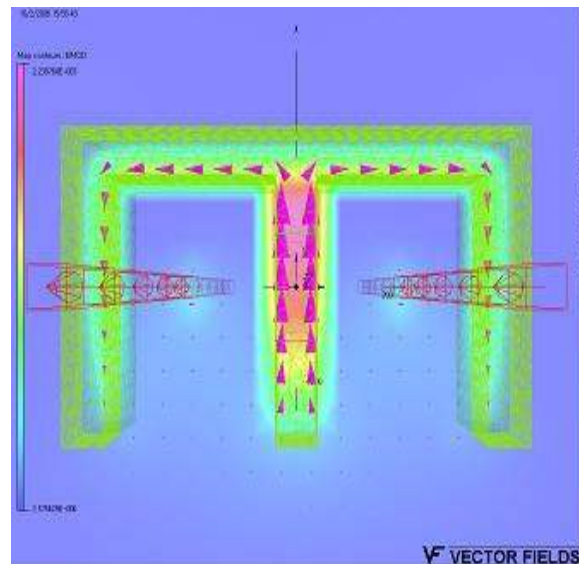


그림 3. 코어의 두께가 110mm일 때

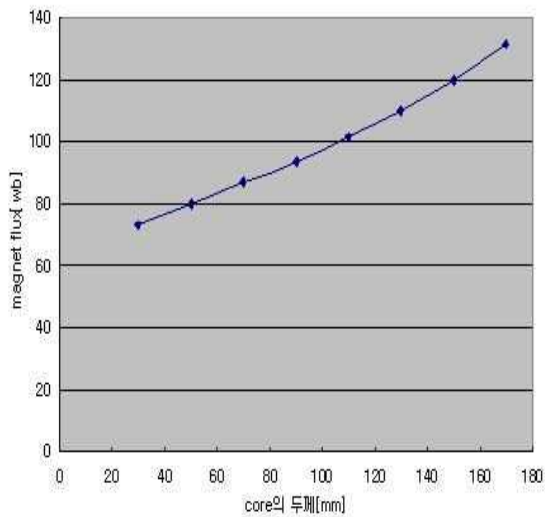


그림 4. 코아의 두께에 따른 magnetic flux

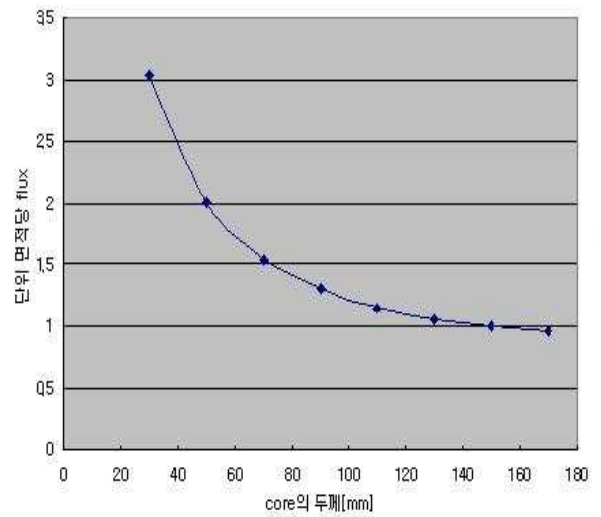


그림 5. 코아의 두께에 따른 단위면적당 flux

### 2.2.2 TYPE 2(오클랜드 파크 적용 모델)

두 번째 형상은 오클랜드 파크 적용 모델이며, 1차측 코일을 2차측 코어가 감싸고 있으며, 2차측 코일은 2차측 코어에 감겨져 있는 형태이다. 두 번째 유도급전 모델의 형상은 다음 그림 6과 같다.

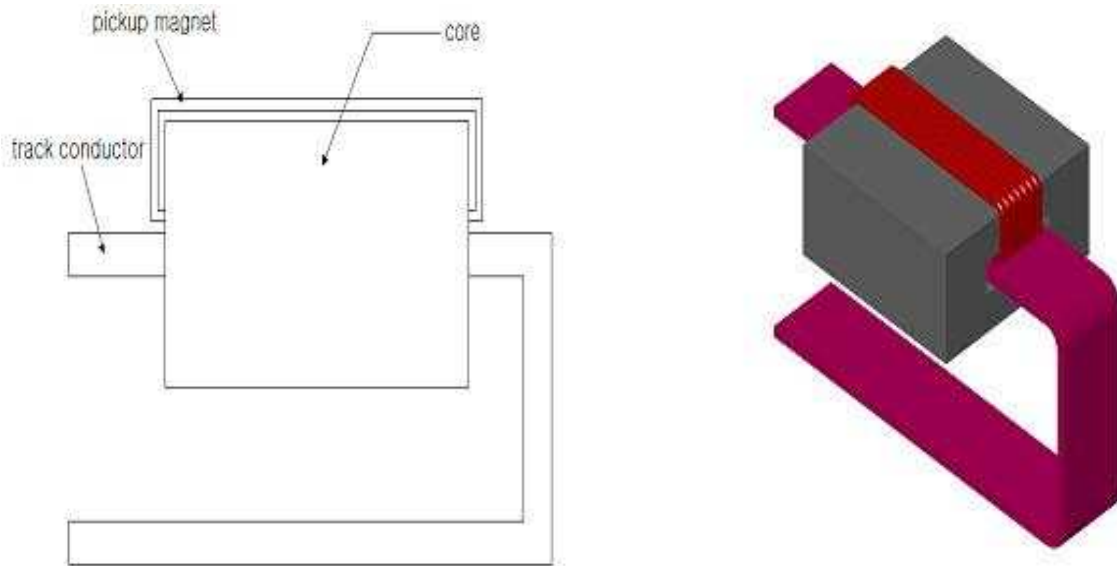


그림 6. TYPE 2 모델 형상

이러한 형상을 갖는 모델에 대해서, 2차측 코어의 두께를 100~250mm 까지 30mm씩 증가시켜가며 전자기장 해석을 수행하였고 다음 그림 7, 8은 그 전자기장 해석 결과를 그림으로 나타낸 것이다. 화살표는 자장의 방향과 세기를 나타낸 것이며, 코아의 두께가 두꺼워짐에 따라 자장이 코아에 집중되지 않고 넓게 분포되는 경향을 나타내고 있다. 코아의 두께가 두꺼워짐에 따라 처음에는 flux의 양이 증가하지 않다가, 코아의 두께가 170mm보다 두꺼워지면 flux의 양이 증가하는 것을 볼 수 있다. 또한 단위면적당 flux를 볼 때, 170mm 이상이 되어야 증가하는 것을 볼 수 있다. 두 번째 형상으로 유도급전 시스템을 제작하게 된다면, 유도급전 시스템의 전체 한도 무게가 허용하는 범위에서 코아의 두께를 최대한 두껍게 하는 것이 시스템의 성능에 유리하다는 것을 알 수 있다. 즉, 두 번째 형상은 유도급전 시스템의 무게가 모델 선정의 경계조건이 되어야 한다.

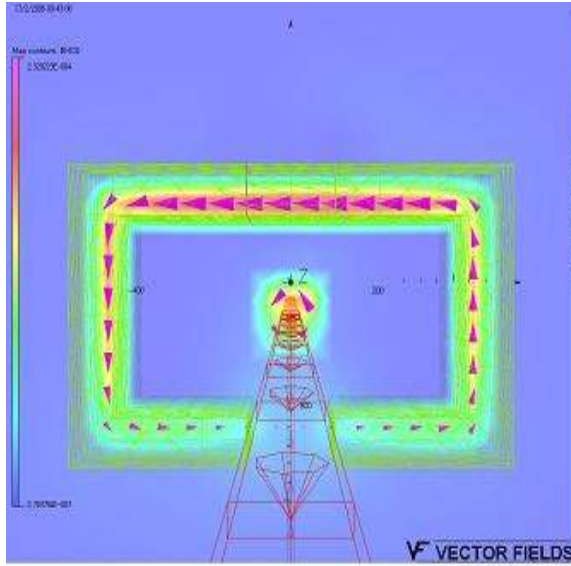


그림 7. 코아의 두께가 100mm일 때

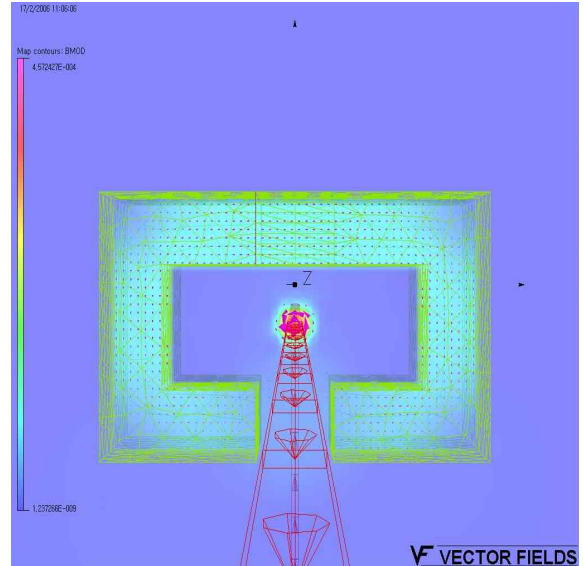


그림 8. 코아의 두께가 190mm일 때

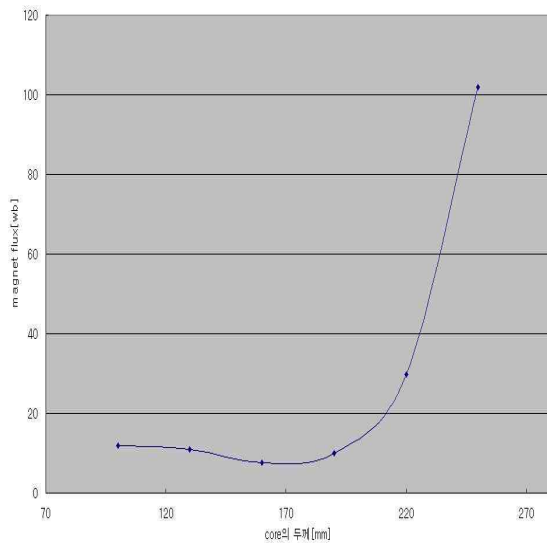


그림 9. 코아의 두께에 따른 magnet flux

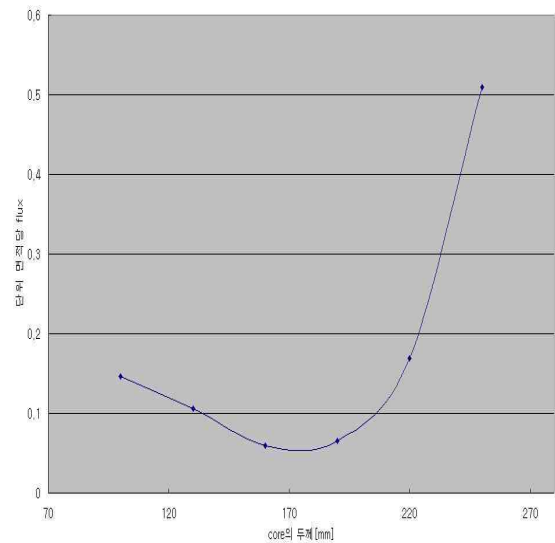


그림 10. 코아의 두께에 따른 단위 면적당 flux

### 2.2.3 TYPE 3(제안 모델)

세 번째 모델의 형상은 첫 번째 형상과 매우 비슷한 구조로 첫 번째 모델보다 효율적이라 판단되는 제안 모델이다. 1차측 코일을 2차측 코어가 감싸고 있으며, 2차측 코일은 2차측 코어에 감겨져 있는 형태이다. 첫 번째 모델의 형상과의 차이점은 2차측 코어에 자속이 좀 더 많이 집속될 수 있도록 끝부분의 공극을 줄였다. 세 번째 유도급전 모델의 형상은 다음 그림 11과 같다. 이러한 형상을 갖는 모델에 대해서, 2차측 코어의 두께를 30~170mm 까지 20mm씩 증가시켜가며 전자장 해석을 수행하였고 다음 그림 12, 13은 그 전자장 해석 결과를 그림으로 나타낸 것이다. 화살표는 자장의 방향과 세기를 나타낸 것이며, 코아의 두께가 두꺼워짐에 따라 자장이 코어에 집속되지 않고 넓게 분포되는 경향을 나타내고 있다.

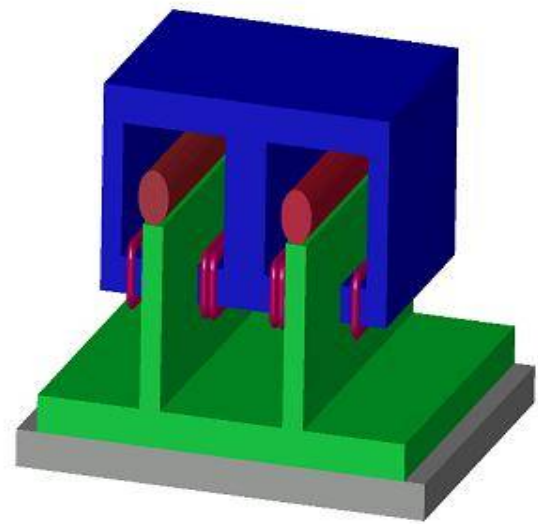
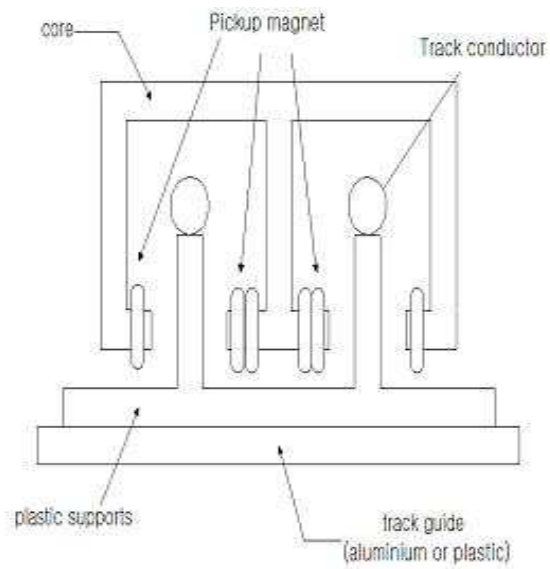


그림 11. TYPE 3 모델 형상

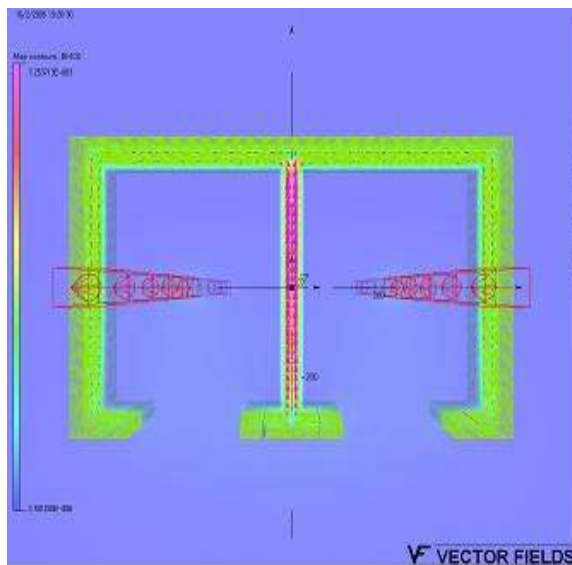


그림 12. 코아의 두께가 30mm일 때

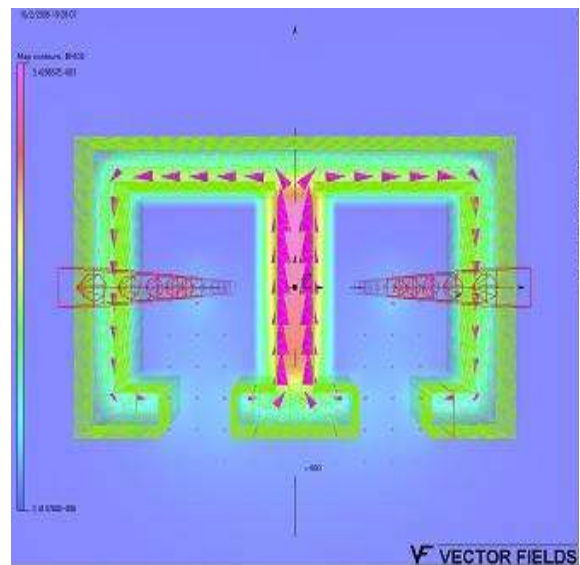


그림 13. 코아의 두께가 110mm일 때

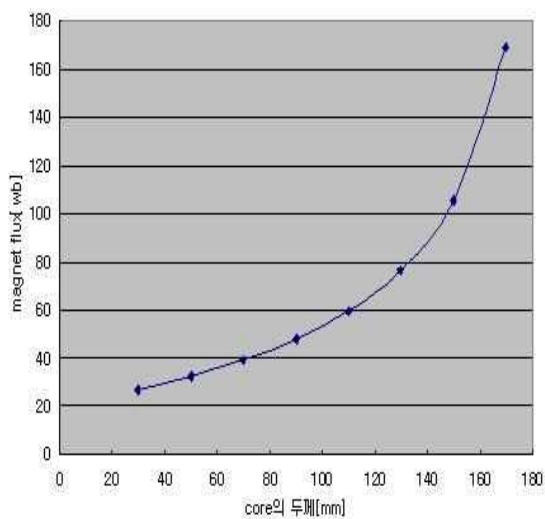


그림 14. 코아의 두께에 따른 magnet flux

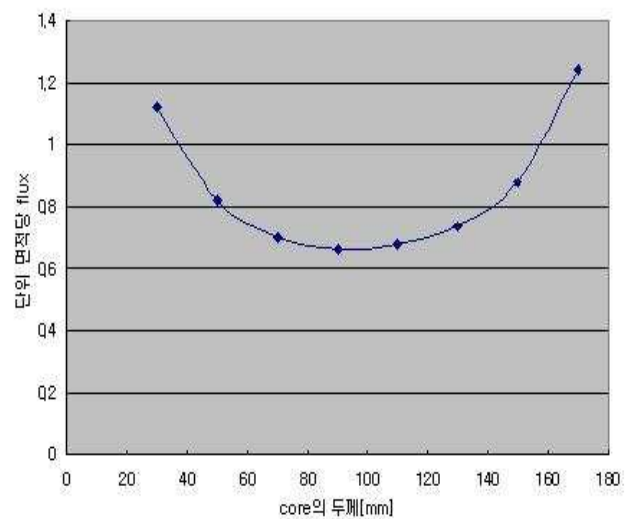


그림 15. 코아의 두께에 따른 단위 면적당 flux

코아의 두께가 두꺼워짐에 따라 flux의 양은 증가하며, 단위면적당 flux는 줄어들다가 늘어나는 것을 확인할 수 있다. 두께가 120mm보다 두꺼워지면, flux의 양이 급격하게 증가하는 것을 볼 때, 코아의 두께를 두껍게 하는 것이 유도급전 시스템의 성능에 유리함을 알 수 있다. 세 번째 모델로 유도급전 시스템을 제작하게 된다면, 무게와 출력 두 가지를 모두 고려하여 형상 설계가 이루어져야 할 것이다.

### 3. 결론 및 논의

유도급전에 관한 선도기술 조사를 통하여, Track Conductor와 Pickup Magnet에 대한 검토 모델들을 선정하고, 전자장 해석 프로그램을 이용하여, 이에 대한 전자장 해석을 수행하였다. 전자장 해석결과를 분석하여, 각 모델들의 성능을 파악하고, 모델들간의 성능 비교를 하였다. 그 비교 결과는 표 1과 같다. 이러한 성능 비교를 통하여, 유도급전 시스템에 가장 적합한 Track Conductor와 Pickup Magnet을 도출하고, 그 결과를 소형케도 시스템의 유도급전 시스템 제작에 활용하도록 하였다. 모델이 선정되더라도 좀 더 세분화하여 공극의 크기나 1차측 코일 사이의 간격 등을 변화시켜가며 비교하여, 유도급전 시스템에 가장 적합하도록 상세 설계가 이루어져야 할 것이다.

표 1. 유도급전 모델별 비교

구분	TYPE 1	TYPE 2	TYPE 3
적용 및 검토	오클랜드 대학	오클랜드 파크	제안
자속	높음	낮음	매우 높음
단위면적당 자속	높음	낮음	매우 높음
모델 제작의 용이성	어려움	쉬움	어려움
중량	가벼움	무거움	가벼움
1차 코일	코일간의 거리 제한	코일간의 거리 유동적	코일간의 거리 제한
2차 코일	설치위치 유동적	설치위치 고정적	설치위치 유동적
경계조건	출력 전압	무게	무게와 출력전압, 가이드 공간

### 감사의 글

본 연구는 지식경제부 2010 철도차량용 급전 및 신호시스템 핵심부품개발사업의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

### 참고문헌

1. K.W. Klontz, D.M. Divan, D.W. Novotnoy, R.D. Lorenz, "Contactless Power Delivery System For Mining Applications," IEEE Trans. on Industry Applications, Vol.31, No.1, pp.27-35, 1995.
2. J.M. Barnard, J.A. Ferreira, J.D. van Wyk, "Optimizing sliding transformers for contactless power transmission systems," IEEE PESC, Vol 1, pp.245-251, 1995.
3. Boys. J. T. and Green. A. W, " Inductively coupled power transmission concept - design and application," IPENZ Trans, pp.1-9, 1995.